

## B-Scan 초음파 측정장비를 이용한 원전 배관 침식손상 검사법 개발

이 대 영<sup>†</sup> · 서 혁 기 · 황 경 모

한국전력기술주식회사, 경기도 성남시 분당구 구미동 188번지 M 타워 801호  
(2012년 5월 11일 접수, 2012년 6월 14일 수정, 2012년 6월 18일 채택)

### Development of Inspection Methodology for a Nuclear Piping Wall Thinning Caused by Erosion Using Ultrasonic B-Scan Measurement Device

Dae Young Lee<sup>†</sup>, Heok Ki Suh, and Kyeong Mo Hwang

KEPCO E&C, M Tower 801, 188, Gumi-dong, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, Korea  
(Received May 11, 2012; Revised June 14, 2012; Accepted June 18, 2012)

U.S. Electric Power Research Institute (EPRI) has developed CHECWORKS program and applied it to power plant piping lines since some lines were ruptured by flow-accelerated corrosion (FAC) in 1978. Nowadays the CHECWORKS program has been used to manage pipe wall thinning phenomena caused by FAC. However, various erosion mechanisms can occur in carbon-steel piping. Most common forms of erosion are cavitation, flashing, liquid droplet impingement erosion (LDIE), and Solid Particle Erosion (SPE). Those erosion mechanisms cause pipe wall thinning, leaking, rupturing, and even result in unplanned shutdowns of utilities. Especially, in two phase condition, LDIE damages a wide scope of plant pipelines. Furthermore, LDIE is the major culprit to cause such as power runback by pipe leaking. This paper describes the methodologies that manage wall thinning and also predict LDIE wall thinning area. For this study, current properties of two-phase condition are investigated and LDIE areas are selected. The areas are checked by B-Scan method to detect the effect of wall thinning phenomena.

**Keywords** : liquid droplet impingement erosion, ultrasonic thickness measurement, B-Scan, A-Scan, wall thinning

#### 1. 서 론

국내외 발전소의 2차측 탄소강 및 저합금강 배관은 관내를 흐르는 증기나 유체에 의해 가속화되는 부식작용인 유동가속부식으로 인해 많은 감육 손상이 발생하였다. 이에 따라 유동가속부식을 관리하기 위한 오랜 연구가 진행되어 미국 전력연구원 (EPRI)이나 프랑스 전력청 (EDF) 등은 CHECWORKS와 BRT-CICERO 등의 전문 유동가속부식 관리 프로그램을 개발하여 현장에 적용함으로써 발전소 배관에서 유동가속부식은 현재 안정적인 수준의 관리 단계에 접어들었다. 그러나 이러한 유동가속부식 관리에도 불구하고 다른 침식기구에 의한 감육 손상이 국내외 발전소에서 여러 사례가 보고되고 있다. 그 중에서 액적충돌침식은 대표적인 침식 경년열화기구로 최근 발전소 배관에서 관리가 필요한 것으로 대두되고 있다. 액적충돌침식은 이상 유체내에 존재하는 물방울 즉, 액적이 고속으로 배관 내부 벽면에 충돌하면서 감육을 일으키는 손상기구이다.<sup>1)</sup> 이를 관리하기

위하여 미국 EPRI는 CHECWORKS 프로그램 내에 침식관리 부분을 추가할 예정이고, 국내에서도 액적충돌침식 진단 시스템을 개발하기 위한 연구가 진행 중에 있다. 이러한 진단시스템 개발 연구의 일환으로 본 연구에서는 액적충돌침식 민감부위를 예측하고 검사할 수 있는 방법을 개발하였다. 이에 따라 액적충돌침식에 관한 지금까지의 연구 결과에 기초하여 액적충돌침식이 의심되는 부위를 현장 배관에서 선정하고, 이를 효과적으로 파악할 수 있는 B-Scan 방식의 초음파 두께측정을 수행하여 침식에 의한 배관 감육 영향을 확인하였다.

#### 2. 연구 방법

국내 발전소 배관에서 액적충돌침식이 확인된 것은 최근의 일로 아직까지 발전소 배관에서 발생하는 액적충돌침식은 체계적인 부위 선정이나 검사 방법에 대한 연구 또는 논의된 내용이 없으며 이를 탐지하기 위한 검사가 수행된 사례 또한 없다. 따라서 본 연구에서는 액적충돌침식과 관련된 국내외 기초 연구결과를 바탕으로 현장에서 직접 적용이 가

<sup>†</sup> Corresponding author: phenix@kepc0-enc.com

능한 액적충돌침식 부위 선정 및 검사 방법을 수립하고자 한다. 현장 적용을 위해서는 실제 배관을 대상으로 검사범위를 선정하고 직접 검사를 수행하여 타당성을 검증하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 국내 원전을 대상으로 검사범위 선정부터 두께측정까지 일련의 검사를 수행하여 타당한 검사 방법을 수립하고자 하였다. 국내 원전은 일정기간 운전 후 연료장전 및 정비를 위한 예방정비기간을 갖는다. 탄소강 및 합금강 배관도 이 기간 동안 유동가속부식을 관리하기 위해 보온재를 제거하고 두께측정을 수행한다. 두께측정은 관련 프로그램이나 운전경험 등에 기초하여 유동가속부식이 의심되는 부위를 검사한다. 유동가속부식에 대한 감육평가 및 부위 선정은 현장 적용이 가능한 수준으로 개발되어 있고 수십년간 누적된 운전경험으로 그 신뢰성을 확보한 상태이다. 그러나 액적충돌침식은 산업계에 적용할 수 있는 정량화된 수준의 이론식 등이 개발된 것이 없기 때문에 현장 배관 침식 관리에 어려움이 있다. 이에 따라 본 연구에서는 1) 액적충돌침식 발생인자에 대한 연구, 2) 액적충돌침식 발생인자와 현장 침식 발생 유사 조건과의 비교 검토, 그리고 3) 현장 액적충돌침식 발생 유사 조건에 대한 두께측정을 통한 검증으로 단계를 나누어 연구를 진행하였다. 이를 통해 현장 적용 가능한 수준의 액적충돌침식 부위 선정 및 두께측정 방법을 수립하고자 하였다.

### 2.1 액적충돌침식 손상기구 확인

액적충돌침식은 초기 아음속의 비행기에 빗방울이 충돌하거나 터빈 블레이드에 미세한 물입자가 충돌하면서 손상되는 것이 확인되어 이를 방지하기 위한 재료 측면의 연구가 많이 진행되었다.<sup>2)</sup> 이후 발전소 배관에서도 이상 유체 조건에서 액적충돌침식이 확인되면서 널리 연구가 확산되었다. 발전소 배관에서 발생하는 액적충돌침식은 터빈 블레이드 등에서 발생하는 액적충돌침식과 그 표면 손상형태가 유사

하다. 즉 고속으로 금속 표면에 충돌한 액적이 강한 충격력과 함께 표면에 제트류를 형성하고 이러한 충격력과 제트류가 금속 표면의 입체 톱(Tip)에서 손상을 일으키면서 분화구 형태의 침식을 가속화시킨다.<sup>2)</sup>

Fig. 1(a)는 국내 원전 엘로우 부위에서 액적충돌침식으로 인해 손상된 사례이고 Fig. 1(b)는 터빈 블레이드에서 액적충돌침식으로 인한 손상사례이다. Fig. 1(c)는 터빈 블레이드에서 액적충돌침식으로 인한 손상사례이다. 그림에서 보는 바와 같이 액적충돌침식은 표면에 미세한 분화구 형태의 손상을 보이는데 액적의 크기나 유체의 상조건 등에 따라 손상형태는 다양하다. Fig. 1(b)는 액적충돌침식 후에 표면을 타고 흐르는 유체에 의한 유동가속부식이 복합적으로 작용하여 유동가속부식과 액적충돌침식이 혼재하는 표면 손상상태를 나타낸다.

### 2.2 배관 상태량 분석을 통한 민감부위 선정

발전소 배관에서 액적충돌침식이 발생하기 위해서는 배관 내에 물입자 즉 액적이 존재해야 발생한다. 배관내에 액적이 존재하기 위해서는 유체가 환상 유동(annular flow)이나 기포 유동(bubble flow) 등의 이상 유체 조건이어야 한다. 그러나 발전소 배관에서 이러한 이상 유체 유동을 직접 확인하는 것은 거의 불가능하다. 다만 부분적으로 측정된 온도, 압력에 따른 유체 상태량 분석을 통해 이상 유체 여부를 파악할 수 있다. 즉 건도가 0과 1사이인 유체 내에서만 이상 유체 조건이 되고 액적충돌침식이 발생할 수 있다. 따라서 액적충돌침식 민감부위 선정을 위해서는 배관내부의 건도 확인이 필수 조건이다. 배관내의 건도는 유체 운전 온도와 압력에 따라 결정되며 단상 조건을 갖는 운전 온도와 압력의 배관이라도 배관내 기기에 의하여 부분적으로 이상 유체 유동이 존재할 수 있다. 따라서 설계문서에 제시된 운전 온도와 압력 조건만으로 정확한 건도를 파악하기는 어렵

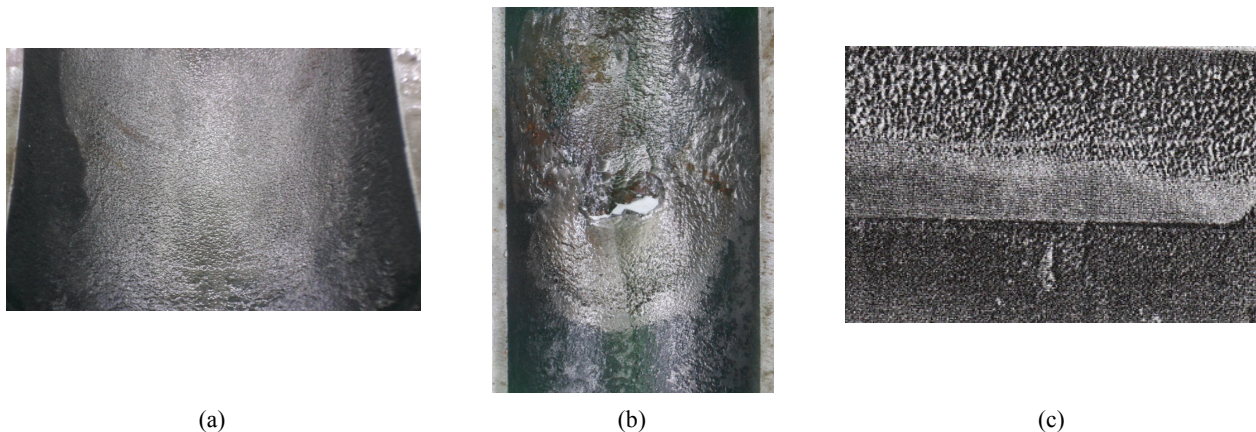


Fig. 1. Damaged pipes and turbine blade due to liquid droplet impingement erosion.

다. 따라서 액적충돌침식 민감부위 선정을 위해서는 대상 배관 계통 및 라인 단위로 열수력해석을 수행하고 이를 통해 배관 기기별 건도를 확인하는 것이 필요하다. 그러나 계통 및 라인 수준의 열수력해석에 상용 3차원 유동해석 프로그램을 이용할 경우 해석 신뢰성은 높지만 광범위한 해석 범위로 인해 상당한 시간이 소요되므로 건도 확인을 위해 이를 적용하는 것은 비효율적이다. 따라서 이에 대한 해결 방안으로 1차원 열수력해석 프로그램인 Network Flow Analysis (NFA)를 이용하여 계통 및 라인 수준의 열수력해석을 수행하고 배관내의 건도를 확인하였다. NFA는 EPRI에서 유동 가속부식을 관리하기 위해 개발한 CHECWORKS 프로그램에 내재된 열수력해석 프로그램이다. 유동가속부식도 배관내의 단상과 이상 유동에 따라 감속률 차이가 크게 나타나므로 이를 반영하기 위한 배관내 열수력해석은 필수적이다.

**2.3 배관 기하학적 형상 분석을 통한 민감부위 선정**

배관 상태량 분석을 통하여 액적충돌침식 영향이 있을 수 있는 곳을 일차 대상 부위로 선정한 후 이차로 배관의 기하학적 형상을 고려하여 최종 검사 부위를 선정하였다. 이상 유

체가 흐르는 배관이라 하더라도 배관의 기하학적 형상에 따라 액적충돌침식의 발생 유무가 결정되기 때문이다. 현장 배관은 이상 유체 유동 조건에서 배관 및 기기 배치에 따라 급격한 유속이 작용하고 유동 방향이 급격히 변경되는 엘보우나 티 등의 배관 기기에서 액적충돌침식이 발생할 수 있다. 국내 발전소는 계획예방정비 기간동안 유동가속부식을 관리하기 위하여 여러 계통 배관에 대한 두께측정을 수행한다. 이러한 유동가속부식 측정 개소들을 최대한 활용하여 액적충돌침식 영향 부위를 선정하는 데 활용하였다. 이에 따라 검사 범위는 급수가열기추기배기계통, 증기발생기취출계통, 주급수계통, 주증기계통 등의 287개 부위에 대하여 상태량 분석과 기하학적 형상 분석을 통하여 검사 대상 부위를 선정하였다. 최종적으로 검사 대상으로 선정할 부위는 급수가열기추기배기계통의 22개소 엘보우, 티 등의 부위로 Table 1과 같다. 타입별로 티 부위 2개소, 티와 같은 형상의 하프 커플링 부위 10개소, 엘보우 부위 10개소이다. 배관 사이즈는 3, 4인치가 대부분이고 12인치 배관도 1개 포함되어 있다.

**Table 1. Inspection points for liquid droplet impingement erosion**

No	Type	System	Nominal pipe size, in	Nominal thickness, in	Minimum required thickness, in
1	Half coupling	Feedwater Heater Extraction & Vent	3	0.216	0.052
2	Half coupling		3	0.216	0.052
3	Half coupling		3	0.216	0.052
4	Half coupling		3	0.216	0.046
5	Half coupling		3	0.216	0.046
6	Elbow		4	0.237	0.007
7	Elbow		4	0.237	0.007
8	Elbow		4	0.237	0.007
9	Elbow		4	0.237	0.007
10	Elbow		3	0.216	0.006
11	Half coupling		3	0.216	0.046
12	Half coupling		3	0.216	0.046
13	Elbow		3	0.216	0.006
14	Elbow		4	0.237	0.007
15	Elbow		4	0.237	0.007
16	Tee		4	0.237	0.007
17	Half coupling		3	0.216	0.059
18	Half coupling		3	0.216	0.059
19	Half coupling		3	0.216	0.059
20	Elbow		3	0.216	0.012
21	Elbow		12	0.406	0.216
22	Tee		4	0.237	0.007

2.4 배관 검사방법 선정

액적충돌침식 민감도 분석결과에 따라 검사 대상 부위로 선정된 배관들은 초음파 장비를 이용하여 두께측정을 수행하였다. 두께측정은 기존 포인트 측정의 A-Scan 방식을 사용하지 않고 측정 부위를 선형적으로 측정하는 B-Scan 방식을 적용하였다. 포인트 측정방식의 A-Scan은 넓은 면적에 걸쳐 고르게 부식되는 유동가속부식 두께측정에 적합하다. 액적충돌침식은 유동가속부식에 비해 상대적으로 좁은 면적에서 액적이 충돌하는 부위만 집중적으로 감육이 진행된다. 따라서 현재와 같은 격자 형태의 포인트 측정방식으로서는 격자 포인트 사이에서 액적충돌침식이 진행될 경우 감육을 탐지하기가 어렵고, 감육량 판단에 필요한 정확한 측정값을 얻을 수 없다. 따라서 액적충돌침식의 발생 기구를 고려한 감육 탐지를 위해서는 선형적으로 측정 범위에 걸쳐 빠짐없이 두께측정을 수행하는 것이 필요하다. 이와 같은 2차원 형태의 거리에 따른 배관 두께값을 확보할 경우 정확한 감육 단면을 확보함으로써 침식 경향과 부위를 보다 더 정확하게 파악할 수 있다.

2.5 B-Scan 결과 검증

현장 배관에 대한 B-Scan 측정 전에 절단면이 확보된 실제 배관을 대상으로 B-Scan을 수행함으로써 결과의 신

뢰성을 확보할 수 있도록 하였다. Fig. 2는 B-Scan 초음파 측정을 수행한 절단된 배관의 내외부 측정면과 측정 결과이다. Fig. 2(a)의 붉은 점선은 배관 외부의 측정면을 나타낸 것이고 Fig. 2(b)의 붉은 점선은 외부에서 B-Scan한 배관의 내부 절단면이다. Fig. 2(c)는 이러한 내부 모습을 확대한 사진으로 배관 내부는 마그네타이트로 고르게 부식되었을 뿐 표면에 특이한 굴곡은 확인되지 않았다. 이러한 내외부 측정면을 갖는 현장 배관에 대하여 B-Scan 측정을 수행한 결과는 Fig. 2(d)와 같다. 그림에서 검은 직사각형 단면이 측정 배관의 두께 단면을 나타낸다. 검은색 직사각형 하단부의 미세한 굴곡은 배관 내부의 조도에 따른 미세한 두께값 차이를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 B-Scan은 정확한 값으로 내부 단면을 측정할 수 있는 것으로 확인되었다.

2.6 현장 측정

액적충돌침식 민감도 선정 기준에 따라 선정된 급수가열 기추기배기계통의 22개 배관 부위를 대상으로 B-Scan 측정을 수행하였다. Fig. 3(a), 3(b)는 22개 측정 대상 중 엘보우와 하프 커플링 배관에 대한 B-Scan 측정 모습이다. 대부분의 배관은 그림과 달리 높은 곳에 설치되어 있기 때문에 검사를 위해서는 비계틀 등의 접근 설비가 필요하였다.

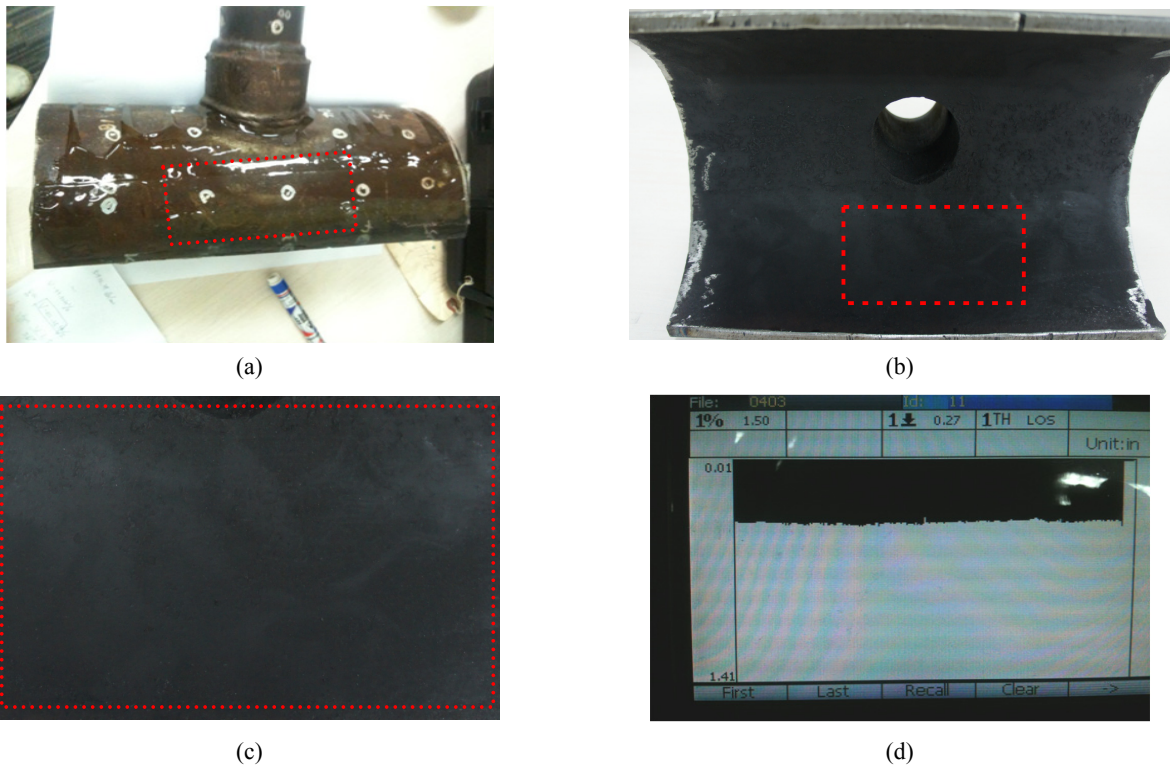


Fig. 2. B-Scan test measurement results.

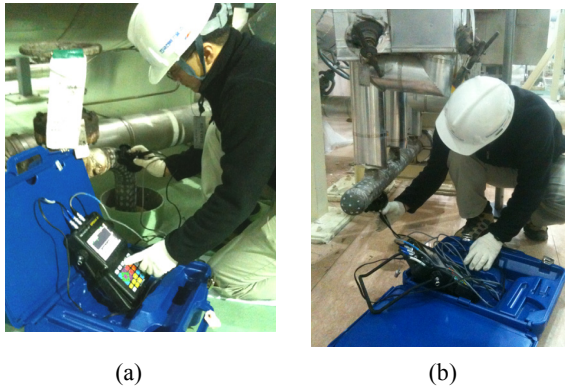


Fig. 3. B-Scan measurement for plant pipings.

검사 부위는 유동가속부식을 위한 두께측정 부위와 겹치는 부위도 있으며 새롭게 추가로 선정된 부위도 포함되어 있다.

### 3. 연구결과 및 고찰

현장에서 확보한 측정값을 이용하여 감육량 분석을 수행하였다. 이번 현장 측정 결과, B-Scan 장비는 탐촉자의 감도 문제로 인하여 재현성은 A-Scan에 비하여 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 A-Scan 측정방식은 한 개의 포인트가 측정면에 접촉하는 것에 비하여 B-Scan은 네 개의 바퀴와 중앙에 있는 한 개의 탐촉자가 있는 인코더(Encoder)

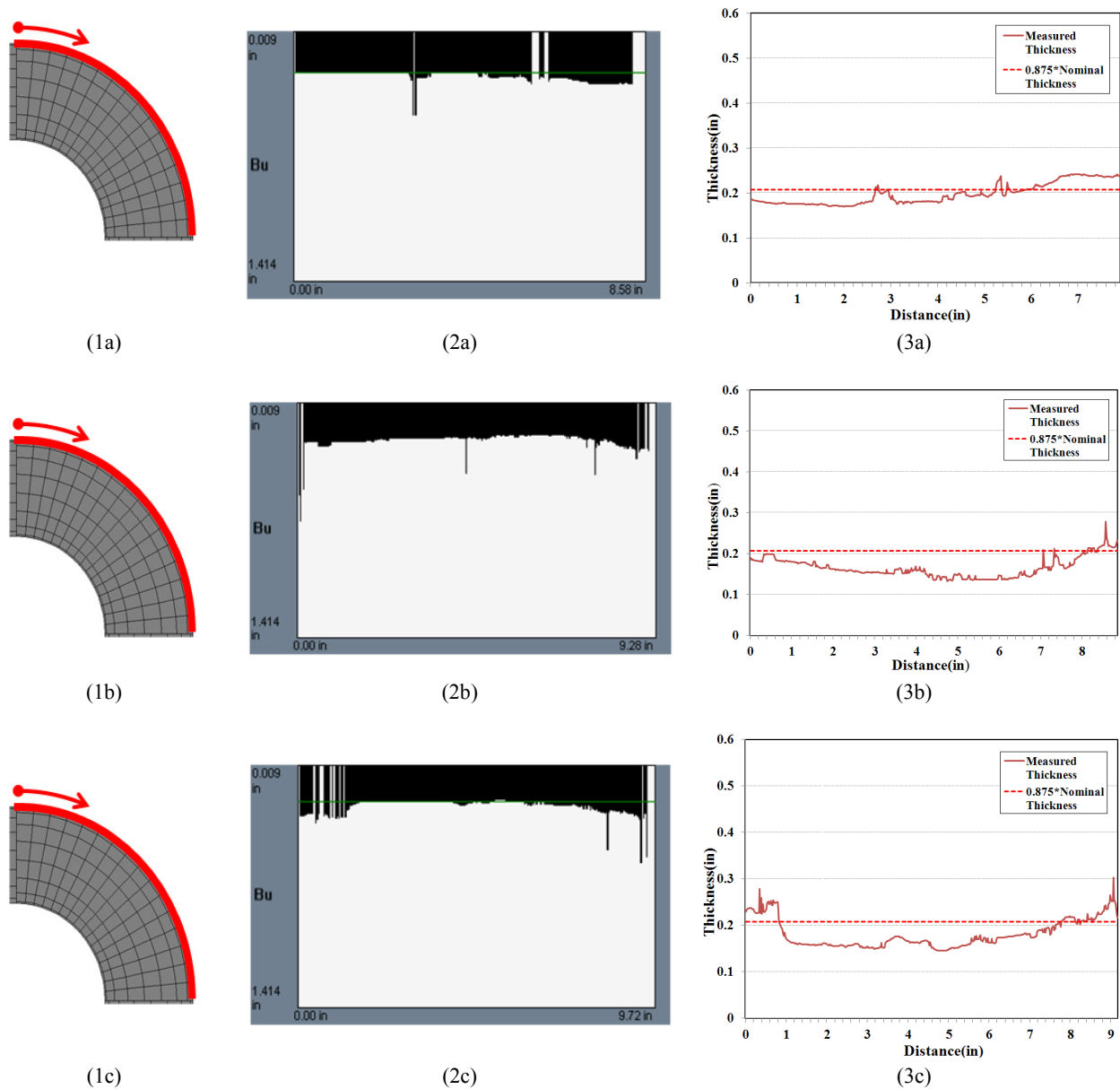


Fig. 4. Elbow B-Scan results of expected points for liquid droplet impingement erosion.

가 배관에 접촉하는 형태로서 모두 5개 포인트가 배관 측정면에 접촉하기 때문인 것으로 파악되었다. 배관 접촉면이 고르지 않을 경우 Encoder에 의한 측정 결과는 Fig. 4(2a), (2b), (2c)와 같이 고르지 못한 측정 파형을 그리는 것으로 나타났다. 이러한 부분은 육안으로 충분히 파악할 수 있으며 실제 감육량 분석시 측정값에서 제외하였다. Fig. 4(1a), (1b), (1c)은 현장 측정 엘보우에 대한 측정방향과 부위를 나타낸 것이다. 측정 방향은 유체의 흐름과 같은 방향으로 측정하여 유체 흐름에 의존적인 액적충돌침식의 영향을 파악할 수 있도록 하였다. Fig. 4(2a), (2b), (2c)는 실제 측정 한 B-Scan 결과들이다. 그림에서 상단부분이 초음파 탐촉자가 접촉하는 배관 표면이고 이 부분으로 측정 초음파가 침투한다. 그리고 검게 표시된 부분이 초음파가 도달하고 되돌아오면서 거리로 표시되는 값이다.<sup>3)</sup> 부분적으로 하양

게 빈 부분은 접촉 불량으로 인하여 초음파 측정값이 얻어지지 않은 구간이다.

Fig. 4(3a), (3b), (3c)는 두께측정값을 그래프로 나타낸 것이다. 실선이 측정값이고 점선은 공칭두께의 87.5%를 곱한 값으로 건설 초기에 설치한 배관의 최소 설치 두께값이다. 엘보우 측정 부위 대부분은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 건설 초기 최소 설치 두께값 이하로 측정 결과가 나타나 액적충돌침식에 의한 감육 영향이 있는 것으로 확인되었다. Table 2는 측정 엘보우에 대한 감육률을 계산한 것이다. 측정범위에서 최대값과 최소값의 차를 감육량으로 고려하고 현재까지의 운전주기를 운전시간으로 환산하여 감육량을 평가하였다.<sup>4)</sup> 측정 결과에서 인접부위와 비정상적으로 차이가 있는 값은 측정기기의 민감도에 따른 오차이거나 측정 기량에 따른 오차로 판단하여 최대값과 최소값 선정에서

Table 2. Wear rate calculation for measured points

Type	87.5% * Nominal thickness, in	Wear, in	Wear rate, in/year	Remark
(1a) Elbow	0.20738	0.073	0.00315	TF260AEG
(1b) Elbow	0.20738	0.065	0.00280	TF260AEP
(1c) Elbow	0.20738	0.067	0.00289	TF351AEP

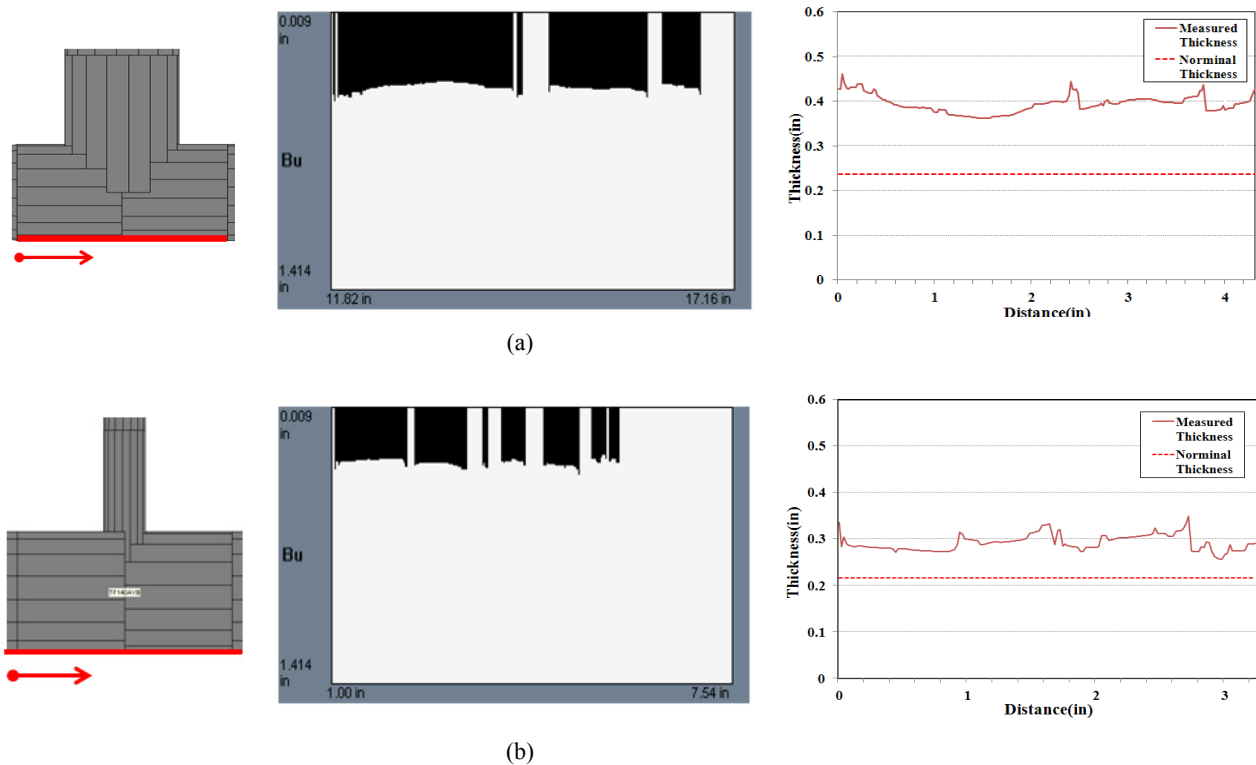


Fig. 5. B-Scan results for measured points.

제외하였다. 측정 대상 배관은 모두 최초 설치 이후에 교체되지 않았고 발전소 가동시 전 시간 운전되는 배관이므로 20주기 현재까지 누적된 203,021 시간을 운전시간으로 사용하였다. 그 결과, 세 엘보우의 감육률은 0.00280~0.00315 in/year (0.0712~0.0800 mm/year)로 계산되었다.

Fig. 5는 티와 하프 커플링 배관에 대한 두께측정 결과를 보여준다. 배관 하부 측정으로 인한 불안정한 측정 자세로 인해 접촉이 원활하지 않을 경우 측정되지 않는 부위도 있으나 미측정값은 전체 측정값과 비교할 때 일부이고 거리가 짧기 때문에 양쪽 측정된 값을 내삽하여 보정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 티에서는 감육이 의심되는 부위도 일부 포함되어 있으나 엘보우와 달리 모두 초기 공칭두께를 상회하는 값으로 측정되어 감육이 진행된 것으로 판단하기 위해서는 보다 많은 부위에 걸쳐 측정 결과의 확보가 필요한 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 국내 처음으로 액적충돌침식에 대한 민감도 기준을 수립하고 기준에 따라 선정된 현장 배관을 대상으로 두께측정을 수행하여 감육 영향을 파악함으로써 초기 단계의 액적충돌침식 검사 방법을 수립할 수 있었다. 검사 대상 모집단이 예방정비기간에 계획된 유동가속부식 관리를 위한 두께측정 배관을 대상으로 하였기 때문에 민감도 기준에 충실한 배관을 선정하는데 한계가 있었음에도 불구하고 검사 대상 배관에서 액적충돌침식에 의한 감육 부위를 확인하는 성과를 얻을 수 있었다. 또한 국내 처음으로 배관 두께

측정에 B-Scan 방식을 적용함으로써 측정 범위의 전 부위에 걸쳐 최대와 최소 측정값을 획득하여 감육률 계산에서 실제 조건에 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 A-Scan으로는 얻을 수 없는 감육 경향을 파악할 수 있는 배관 단면을 확보함으로써 이를 더 발전시킬 경우 현장 감육 진단에 효과적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 측정 오차를 처리할 수 있는 정량화된 방법을 수립하고 견도 및 기하학적 형상별 측정 부위를 세분화 한다면 보다 효과적으로 액적충돌침식 방법론을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2010T100101014)

#### 참 고 문 헌

1. Jeffrey Horowitz, 2004, Recommendations for Controlling Cavitation, Flashing, Fluid Droplet Impingement, and Solid Particle Erosion in Nuclear Power Piping Systems, EPRI, 1011231, p. 3-2 (2004).
2. G. W. Vickers, W. Johnson, Int. J. Mech. Sci., **14**, 765 (1972).
3. Olympus, EPOCH XT User's Manual, 910-260-EN, Rev. G, p.185 (2011).
4. Jeffrey Horowitz, Recommendations for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program (NSAC-202L-R3), EPRI, p. 4 (2006).